科学通报 2015 年 第 60 卷 第 28-29 期：2707 ~ 2718
特邀评述 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

光学薄膜微细结构制造方法新进展

易培云[①], 彭林法[①], 来新民[①②*]

① 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240;
② 上海市薄板结构数字化制造重点实验室, 上海 200240
* 联系人, E-mail: xmlai@sjtu.edu.cn

2014-12-18 收稿, 2015-02-28 接受, 2015-04-10 网络版发表
国家自然科学基金重点项目(51235008)资助

摘要 带有表面微细结构的光学薄膜可有效提高出光效率或光线利用率, 有望大规模应用于柔性显示器和薄膜太阳能电池等光学器件. 这类三维功能结构尺度在微米或亚微米范畴, 其形状精度、结构缺陷、残余应力等几何特性和物理性能综合影响光学薄膜质量. 紫外光固化(UV curing)和热压印(hot embossing)成形是光学薄膜微细结构制造的主要方法. 本文综述了两种制造方法的主要进展, 包括成形工艺、模具制造和成形装备等, 这些研究成果的获得对光学薄膜的设计与制造具有重要意义. 目前, 尚需进一步阐明制造过程中材料流动规律和缺陷形成机理, 形成控形控性新方法, 指导光学薄膜微细结构的高效、高精度制造.

关键词
光学薄膜
微细结构
紫外光固化
热压印
卷对卷

近年来, 新能源与节能技术、新媒体与信息技术得到迅猛发展, 带有表面微细结构的光学薄膜受到广泛关注, 其典型代表如柔性显示器和薄膜太阳能电池. 如图1(a)所示的柔性显示器厚度小于1 mm, 能够实现任意弯曲, 但由于材料折射率不同使得光线在界面上发生反射, 导致出光效率不足20%[1,2]. 图1(b)所示为薄膜太阳能电池, 可以满足曲面铺设, 但光线利用率也不足60%[3,4]. 在光学薄膜表面加工微细结构是提高出光效率或光线利用率的有效方法, 如图1(c)和(d)所示分别为柔性显示器薄膜基片上的微透镜结构和柔性薄膜太阳能电池基片上的微细光陷阱结构. 这类三维功能结构的尺度在微米或亚微米范畴, 其形状精度、结构缺陷、残余应力等几何特性和物理性能综合影响着出光效率或光线利用率. 如何高效、高精度制备光学薄膜微细结构尚面临巨大技术挑战.

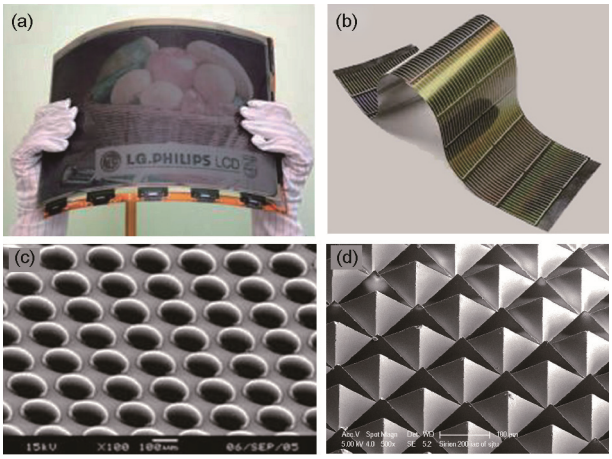

图 1 (网络版彩色)光学薄膜微细结构及典型应用. (a) 柔性显示器; (b) 薄膜太阳能电池; (c) 微透镜阵列; (d) 光陷阱结构

Figure 1 (Color online) Micro structures on optical thin film and its applications. (a) Flexible display; (b) thin film solar cell; (c) microlens array; (d) light trapping structures

光刻胶热熔法、软刻蚀法等是光学薄膜的传统制造方法, 其加工效率低、成本高, 难以适应批量化生产要求; 丝网印刷是大批量制造模式, 但微细结构精度难以控制. 近年来快速发展的紫外光固化(UV curing)和热压印(hot embossing)成形已成为光学薄膜微细结构制造的主要方法[5], 先后经历了平对平压印

引用格式: 易培云, 彭林法, 来新民. 光学薄膜微细结构制造方法新进展. 科学通报, 2015, 60: 2707–2718
Yi P Y, Peng L F, Lai X M. Recent progress in fabrication methods for micro structures on optical thin film (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 2707–2718, doi: 10.1360/N972014-01365

(plate-to-plate, P2P)、辊对平压印(roll-to-plate, R2P)和卷对卷压印(roll-to-roll, R2R)发展过程. UV固化成形利用液态UV胶良好的流动性实现充型, 然后在紫外线光照射下形成激发态分子, 进而分解成自由基或离子, 使不饱和有机物发生聚合、接技、交联等化学反应而实现固化, 最后脱模得到微细结构, 其工艺过程如图2(a)所示. UV固化成形压力和温度低、加工精度和效率高, 适用于深宽比较高的亚微米结构加工. 热压印工艺利用热塑性聚合物在玻璃转化温度(T_g)以上的低变形阻力特性, 将聚合物材料加热到T_g以上, 然后施加压力将模具表面的微细结构直接复制到聚合物材料表面, 基本原理如图2(b)所示. 热压印成形温度和压力较高, 结构与基底同材质, 适用于深宽比较低的微米结构加工. 本文将围绕这两种典型加工方法的成形工艺、模具制造和成形装备等方面综述近年来的主要研究进展.

1 成形工艺

1.1 UV固化成形工艺

UV固化成形工艺主要包括充型、光固化和脱模过程. P2P UV固化成形工艺报道最早见诸于1973年[6], 直到2006年, Ahn等人[7]将卷对卷运动方式和UV固化成形复合, 提出了R2R UV固化成形的大批量制造模式, 推动了光学薄膜制造进入工业化阶段. 目前, 世界主流光学薄膜制造商, 如3M, DuPont, Samsung, Fuji Film等均以R2R UV固化成形作为主要技术路线[8]. 尽管如此, UV固化工艺尚面临充型缺陷、固化不均、脱模困难等挑战, 尚需进一步的理论突破和技术创新. 以下从充型、光固化和脱模3方面综述UV固化成形工艺的国内外主要进展.

(ⅰ) 充型过程. 充型过程是UV固化成形的核心工艺, 其产生的缺陷将在后续工艺传递、累积和放大, 并在最终产品中体现. 气泡是充型过程中最常见的缺陷, 导致光线的反射和散射等. Ye等人[9]基于不可压缩牛顿流体理论建立了仿真模型, 分析了不规则气泡的形成过程, 认为树脂搅拌是气泡缺陷的主要诱因. Morihara等人[10]研究了气泡俘获现象, 分析了材料黏性及接触角对气泡俘获的影响规律, 发现只有当接触角在合适的范围时才能消除气泡、完全充型. Kim等人[11]也开展了类似研究, 认为树脂材料的流动行为受到接触角和特征宽度的影响, 小的特征深宽比低有利于完全充型. 为克服气泡缺陷, Huang等人[12]将充型过程抽真空, 制备了没有气泡的导光板结构. Hiroshima等人[13]采用五氟丙烷代替空气, 发现当五氟丙烷流量大于150 sccm、压力大于0.5 MPa、保压时间大于20 s时不会产生气泡, 认为五氟丙烷具有与真空类似的辅助充型效果.

残余层是充型过程中的另一类缺陷, 对光线吸收和薄膜双折射有重要影响. Ahn和Guo[14]构建了R2R UV固化成形过程中残余层厚度预测模型, 建立了残余层厚度与辊压力和速度的映射关系. Schmitt等人[15]探讨了胶层黏度对残余层的影响, 认为残余层厚度与UV胶黏性的平方根成正比. 为减少残余层, Ding等人[16]提出了UV固化成形工艺的6步载荷工艺方法, 通过精确控制各步骤中模具压力, 减少模具变

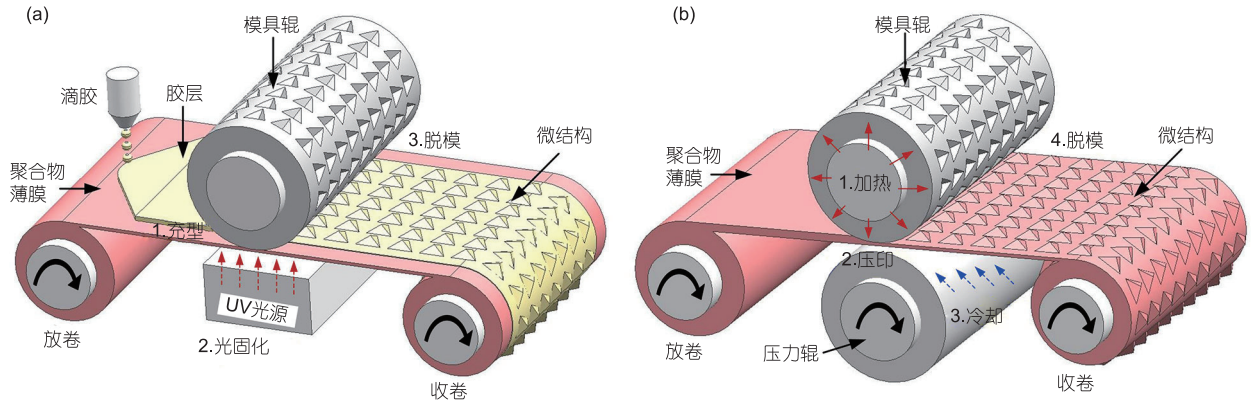

图 2 (网络版彩色)光学薄膜微细结构制造方法示意图. (a) R2R UV 固化成形; (b) R2R 热压印成形

Figure 2 (Color online) Schematic of fabrication methods for micro structures on optical thin film. (a) R2R UV curing process; (b) R2R hot embossing process

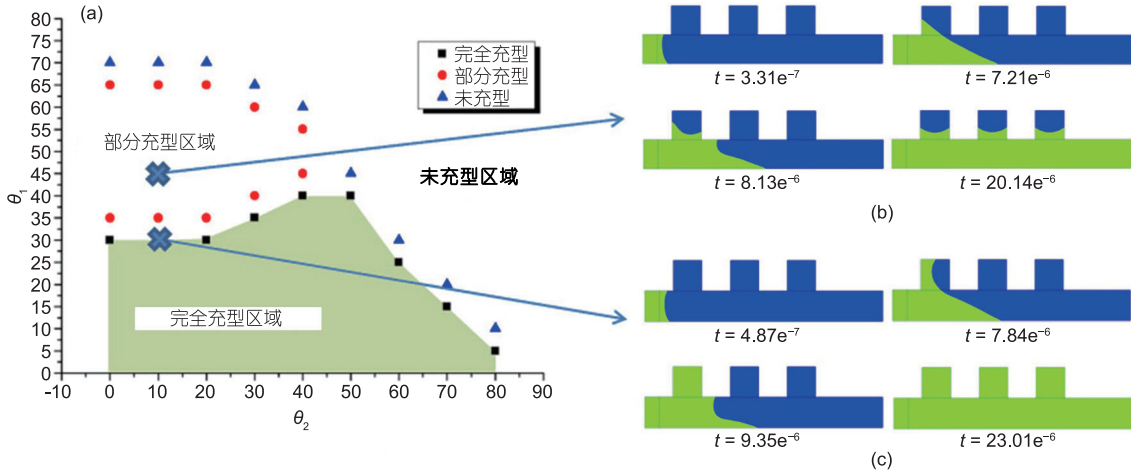

图 3 (网络版彩色)UV 固化成形工艺过程中材料充型机理. (a) 成形窗口; (b) 不完全充型过程; (c) 完全充型过程[11]

Figure 3 (Color online) Resist filling behavior in UV curing process. (a) Process window; (b) incomplete filling process; (c) complete filling process[11]

形从而减薄残余层厚度. 类似地, Yan等人[17]提出了多步压印工艺方法, 在保证纳米结构的成功复制的前提下减小残余层厚度. Lan等人[18]提出了一种释放压力减少变形的载荷施加方法, 用于PDMS软模UV固化成形工艺中减少几何畸变. Weng等人[19]通过真空辅助充型方法加工波导元件, 没有发现残余层.

此外, 近年来有学者关注到在UV固化成形的充型阶段, 液态UV胶在微细模腔中的流动充型规律与宏观尺度下存在显著差异, 即为尺度效应. Nagaoka等人[20]建立了UV固化成形过程仿真模型, 研究了多种特征尺寸下的UV胶充型过程, 发现在微米尺度下的充型时间随着特征尺度的减小而减少; 而在纳米尺度下的充型时间随特征尺度减小反而增加, 认为该现象是由于表面张力的尺度效应造成. Yao和Kim[21]研究了黏度、壁面滑移和表面张力等尺度依赖的参数对材料充型的影响, 发现当流道尺寸在几微米或者更小时总会出现壁面滑移现象. Tian等人[22]建立了充型过程数值仿真模型, 描述了表面张力、接触角以及液固交界滑移等的尺度效应.

(ⅱ) 光固化过程. 高速光固化决定光学薄膜的加工效率和微细结构内部性能, 是UV固化工艺过程控形控性的关键. 探索树脂材料在紫外光作用下的固化机理, 提高材料转化率并降低材料收缩率是学术研究热点. 早在1991年, Bowman和Peppas[23]提出了自由体积理论, 将树脂材料中多余体积假设为自由体积, 初步描述了树脂在紫外光作用下的转化过程. 在此基础上, Neo等人[24]进行了通用化处理, 将多余体积分成自由体积和占用体积, 解释了固化过程中自由体积分数与实际存在偏差的原因, 基于此建立的仿真模型预测了光聚合反应动态转化行为. 此外, Neo和Park[25]进一步完善了模型来描述紫外光固化过程中的单体转化. 在材料收缩方面, Horiba等人[26]采用转移函数估计了UV固化成形中材料收缩导致的微细特征相对临界尺寸误差, 提出了模具修正方法以补偿光学薄膜微细特征的收缩. Amirsadeghi[27]报道了一种侧向收缩应力的测量方法, 通过测量摩擦系数、黏着力以及模具结构几何参数, 计算出在侧壁上的固化收缩应力, 为UV固化成形收缩研究提供了实验手段.

紫外光剂量是光学薄膜微结构控形控性的重要参数, 过低的剂量将导致胶层不完全固化且结构内部折射率不均匀; 而过高的紫外光剂量将导致胶层过固化, 造成过多的收缩、脆性并给脱模带来困难, 且结构内部存在残余应力. Hirai[28]基于时域有限差分法建立了UV固化成形工艺仿真模型, 模拟了发射光在不同微结构中的电磁传播, 实现了Maxwell方程的数值求解. He等人[29]仿真了紫外光源的光强分布, 并实现了UV固化成形工艺中光源参数的调整. Zhang等人[30]建立综合衍射、折射和反射的分析模型, 研究了高深宽比微细流道中工艺参数的影响, 认为曝光剂量、衍射、反射及空气隔层等工艺参数对微细流道形状有很大影响. Kirchner等人[31]将脱模力作为胶层

固化的测量手段, 认为光照剂量低于累计剂量极限的50%, 预曝光的薄膜可以实现成功压印, 而一旦剂量超过极限, 缺陷就开始产生.

(ⅲ) 脱模过程. 如何脱模是高深宽比结构UV固化成形工艺的一大挑战. UV胶的交联程度决定了收缩率和固化后的树脂模量; 收缩可以通过产生压力阻碍脱模过程和通过破坏交界面来促进脱模, 而固化树脂的高模量能够减少树脂剥离模具时发生的破坏, 因此需要寻求最佳的收缩量. Amirsadeghi等人[32]仿真研究了胶层成分对固化和脱模步骤中应力的影响, 发现破坏强度随着交联剂成分的增加而增加, 同时树脂的破坏应力也相应增加. 通过将树脂整体最大局部应力对其破坏强度进行归一, 获得了成功脱模的最优交联剂比重. Park等人[33]研究了交联收缩、固化材料模量、交界破坏强度和韧性以及脱模的加载方式对脱模应力的影响, 获得了实现最小主应力的最优收缩量. Yeo等人[34]运用超弹性材料模型建立了率无关内聚力模型, 研究了深宽比为14的微细结构的脱膜工艺, 优化了脱模过程并获得了最优收缩量.

为提高脱模能力, 通常在模具和胶层间添加抗黏涂层. Zhou等人[35]采用气相淀积法在模具表面制备了FDTS抗黏涂层, 实验表明FDTS很适合用作模具抗黏涂层. Taniguchi等人[36]利用铬和氟化硅烷偶联剂作为抗黏涂层, 提高了抗反射结构成形中的脱模效果, 制备了完整的抗反射结构. 然而, 在实际成形过程中, 抗黏涂层存在转移和老化现象, 脱模效果逐步降低. Yan等人[37]采用不同分子式的有机硅作为模具抗黏涂层, X射线光电子光谱分析追踪硅膜和PEGDA模具的表面化学成分, 发现随着模具使用次数的增加, 硅会从硅膜往模具上转移. Houle等人[38]通过黏接和化学测试法分析了抗黏涂层和UV胶的反应, 发现减少抗黏涂层和胶层之间的反应有利于提高抗黏涂层耐久性.

1.2 热压印成形工艺

热压印工艺主要包括加热、充型、冷却和脱模过程. 早在1970年, Bartolini等人[39]将热压印成形工艺首次用于复制全息电影序列, 这几乎与UV固化成形同一时期出现. 到1997年, Chou等人[40]通过R2P热压印实验成形出小于100 nm的微细结构以后, 学术界重新掀起了研究热潮, 但工业化进程相对缓慢. 目前, 已工业化应用的主要为P2P热压印成形工艺, 如光学薄膜制造商Toray、东芝机械等[8]. R2R热压印工艺尚处于原型验证阶段, 尚需要进一步的理论支撑和技术突破. 充型过程伴随着复杂的材料状态转变和流动行为, 决定微细结构复制率; 脱模过程伴随材料回弹和缺陷产生, 决定微细结构的最终质量. 以下从充型和脱模方面综述热压印成形工艺的国内外主要进展.

(ⅰ) 充型过程. 聚合物材料存在典型的黏弹性特性, 在较低的温度和较短的充型时间下, 高弹形变占主导; 而在较高的温度下, 压力驱动的黏性流动和表面张力驱动的毛细管流是主要模式. Liu等人[41]将聚合物在高弹态下的成形过程分为下压过程中的应力集中和应变硬化, 以及保压过程中的应力松弛和形变回复. Macintyre等人[42]通过在基材中嵌入微小的基准栅格, 观察到热压印过程中材料的横向流动. 大量研究表明, 单峰和双峰现象是热压印工艺中最常见的两种充型模式, 如图4(a)和(b)所示, 与材料厚度、模腔宽度、压头宽度、工艺参数等直接相关. 对于非真空条件下的热压印成形, 双峰模式下的充模流动更易导致气泡缺陷的产生. Rowland等人[43]对P2P热压印工艺中聚合物材料的充型机制及形变模式做出划分, 认为黏性力与表面张力的比值决定了充模过程的主导机制是毛细管流还是黏性流动、模腔宽度与材料厚度的比值决定单峰或双峰形变模式、压头宽度与残余层材料厚度的比值则决定材料流动的具体形式为斯托克斯流或挤压流, 如图4(c)所示, 这一划分方法提出后得到了较为广泛的认可. 近几年中, Kim等人[44]和Ryu等人[45]研究了压印速度等工艺参数对充型形变模式的影响, 其研究结果表明单、双峰形变模式在热压印充型过程中还存在着动态的变化.

为进一步提高充型效果, 一些学者引入超声波使模具和聚合物间发生高频率碰撞和摩擦, 使聚合物材料迅速达到压印温度, 缩短热循环时间、提高加工效率. Mekaru等人[46]借助超声波振动在开放环境下完成了微结构的热压印成形, 成形过程中接触力和成形时间都得到了显著降低. Lin等人[47]仿真分析了超声波辅助热压印中聚合物流动规律和温度分布, 发现高温区域集中在模具和聚合物的接触面积上, 相应地聚合物材料沿着模具侧壁流动趋势显著. 此外, 气体辅助也是一种提高充型的有效方法, Hocheng等人[48,49]采用10~40 kgf/cm^{2}气体压强, 在聚碳酸

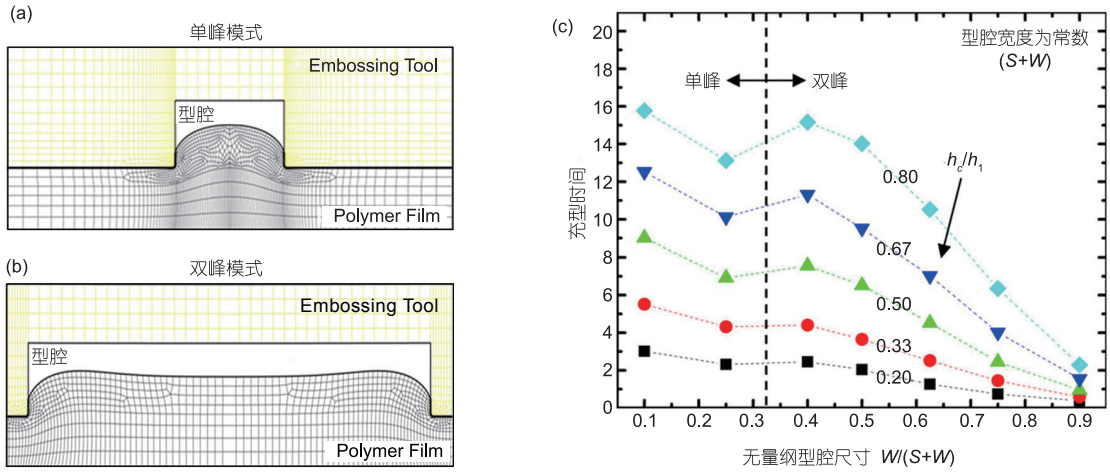

图 4 (网络版彩色)热压印工艺中聚合物充型机理. (a) 单峰充模; (b) 双峰充模; (c) 充型窗口[43]

Figure 4 (Color online) Polymer flow behavior in hot embossing process. (a) Single peak deformation; (b) dual peak deformation; (c) process window[43]

酯试样上制备了300×300微透镜阵列, 取得了较高的一致性.

同样, 热压印成形过程中材料力学行为和流动行为也观察到了尺度效应. Lam等人[50]通过环氧树脂悬臂梁弯曲试验观察到了显著的尺度效应, 并建立了基于应变梯度理论的弹性弯曲模型来描述这种效应. Nikolov等人[51]考虑聚合物链段的旋转熵及分子间相互作用, 建立了聚合物应变梯度效应的微观力学模型, 发现尺度效应与分子链长度、自由体积以及分子交叉链的密度有关. 此外, Yao等人[52]发现聚合物PMMA的非等温热微细压印中, 随着模腔尺寸减小, 聚合物充型机理发生变化, 且尺度效应与压印过程中聚合物温度分布均匀性有关. Jena等人[53]发现聚合物分子链取向及聚合物各向异性是影响热压印成形工艺中微通道可复制性及复制保真度的主要因素.

(ⅱ) 脱模过程. 脱模是将模具和成形后的聚合物材料进行剥离的过程, 脱模温度和脱模力是导致微结构缺陷的主要因素, 最终影响光学薄膜质量. 脱模温度低时, 聚合物流动性能差, 形变回复少, 但冷却耗时长; 脱模温度高时, 聚合物黏性流动占主导, 在表面张力驱动下形变回复显著, 影响最终成形质量. Takagi等人[54]研究了聚合物材料在脱模过程的回弹现象, 证明了脱模温度对聚合物热压印成形质量的影响, 发现脱模温度越高, 脱模后聚合物的形变回复越显著, 最终热压印成形高度越低. Shan等人[55]实验发现在T_g以下卸载之后, 聚合物形变回弹分为瞬时弹性回弹和长程回弹. 在卸载的同时瞬时弹性即刻回弹, 这是由聚合物的瞬时弹性决定的; 而长程回弹则在室温条件下逐渐回弹, 主要由聚合物蠕变特性决定. T_g接近室温的聚合物材料, 长程回弹更明显. Deng等人[56]开展反光膜R2R热压印成形实验, 发现脱模后金字塔微结构存在高矮现象且服从一定统计规律. 如图5所示为成形温度120 ℃, 辊压速度0.4 m/min, 成形力25 kgf条件下的实验结果, 矮金字塔形成的主要原因推测是由辊压脱模回弹造成.

脱模力主要包括热收缩应力、黏着力和摩擦力. Guo等人[57]研究表明热收缩应力主要由于模具和聚合物热收缩差异导致, 集中在微结构的底部; 基于仿真结果在微结构外围设计应力栅栏, 减小了微结构上的热收缩及由热收缩导致的残余应力. Dirckx等人[58]建立了脱模时黏着力和摩擦力与模腔几何结构、聚合物材料属性、脱模温度以及表面粗糙度的解析模型, 发现随着脱模温度降低, 黏着力会相应降低而摩擦力反而增加, 存在一个使黏着力和摩擦力和值最小的最优脱模温度. Worgull等人[59]认为聚合物和模具之间的摩擦系数是脱模过程的重要参数, 实验测量了聚合物材料的动摩擦和静摩擦, 发现随着模具温度降低以及脱模剂使用, 静摩擦系数会显著降低, 但是动摩擦系数变化不明显. Kawata等人[60]研究了模具侧壁倾斜角对脱模力的影响, 结果表明倾斜角越小脱模力越小. Taylor等人[61]使用刀刃测试方法表征了脱模过程中聚合物与模具所需要的脱模能, 为快速判断表面处理后模具的脱模性能提供方法.

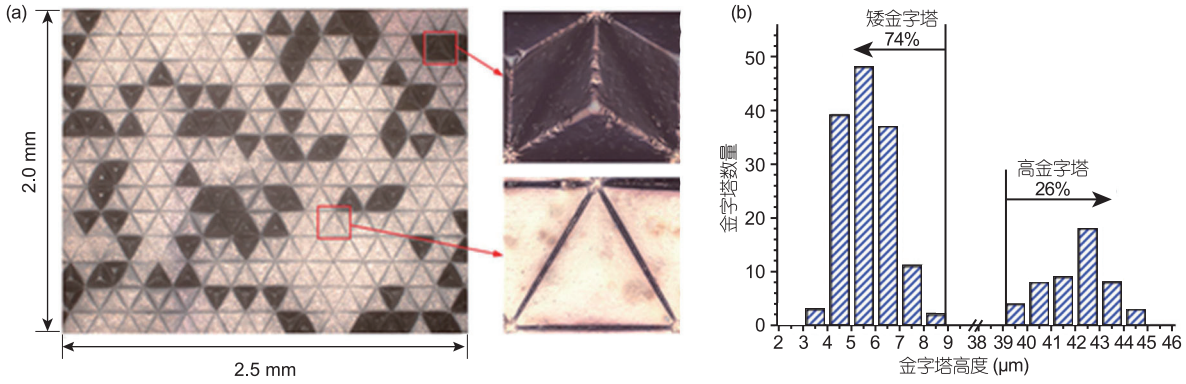

图 5 (网络版彩色)反光膜 R2R 热压印成形实验结果. (a) 金字塔微结构高矮现象; (b) 高矮金字塔统计分布

Figure 5 (Color online) Experimental results of reflecting film by R2R hot embossing. (a) Phenomenon of high-low micro pyramids; (b) statistic distribution of high-low micro pyramids

2 模具加工

光学薄膜微细结构加工是对模具型腔的直接复制, 模具的加工精度和表面质量决定了光学薄膜性能. 目前, 模具加工主要有直接加工法和间接加工法. 直接加工是指在模具上直接雕刻或刻蚀出微细结构, 常用方法有微切削法、微电火花放电加工、飞秒激光加工和激光直写等, 这些加工方法工艺流程短、误差累积小, 模具加工精度高. 李荣彬等人[62]针对自由曲面光学组件的超精密制造, 开发出集成自由曲面光学设计、多轴加工仿真与切削优化、加工误差补偿和自由曲面测量的制造信息平台, 有效减少在同类多轴机床编写复杂数控程序的时间, 优化加工条件与切削策略. 徐宗伟等人[63]采用聚焦离子铣削复杂微纳结构, 实现了闪耀光栅以及正弦结构等复杂微纳结构的加工. 陆亚聪等人[64]采用数字微反射镜(DMD)并行输入的激光干涉直写方法实现了3D光变图像以及各种微图形文字的处理, 为高效率制作高品质光变图像提供了新方法. 间接加工通过转印等方法间接获得最终模具, 常用基于LIGA(Lithography, 光刻)的加工方法, 如紫外LIGA、激光LIGA、电子束LIGA、X射线LIGA等. 这类方法通过转印可实现模具批量加工, 但工艺流程较长, 误差累积影响模具精度, 光刻表面粗糙度较大. Chung等人[65]采用紫外LIGA方法快速加工出导光板微细结构, 从背面照射紫外光, 在光刻胶上获得球形微结构, 利用电铸法获得具有相反微结构的Ni模具. Schelb等人[66]采用电子束光刻方法在PMMA上加工出直径为110±5 nm、间距为250 nm的光子晶体阵列结构, 同样采用电铸法获得相反结构的Ni模.

近年来, 随着卷对卷辊压工艺的发展, 辊子模具的加工引起国内外学者的关注. 主要方法有单点金刚石车削法和旋转光刻法, 如图6所示. 单点金刚石车削法属于直接加工, 其优点是精度高、容易操作、重复性好, 其缺点是效率低、成本高、难以加工大深宽比结构和自由曲面结构. Brinksmeier等人[67]对反射阵列结构的加工策略进行了研究, 利用叠加策略加工出边缘非常尖锐的金字塔状凹槽. Je等人[68]对金刚石车削过程中误差控制进行了研究, 通过严格控制恒温环境, 解决了因温度变化引起的间距误差问题. 步进旋转光刻法属于间接加工, 其优点是成本相对较低、操作简单, 其缺点是精度较低. 该方法主要包含两个关键点: (1) 均匀涂胶; (2) 步进角度和光刻参数的精确控制[69].

3 成形装备

3.1 UV固化成形装备

UV固化成形工艺装备发展相对成熟, 已成为扩散膜、反光膜、光伏EVA膜等光学功能薄膜工业化生产的主要工具. 美国3M公司、芬兰VTT公司和韩国三星等国外企业均已开发出商业化的UV固化成形工艺装备. 国内苏大维格在该领域进行了长达10余年的研究, 开发了系列化的P2P和R2R的UV纳米压印设备. 为进一步提高成形精度和一致性, 国内外学者对UV固化成形装备开展了创新研究. Li等人[70]基于电毛细力原理开发的UV固化成形设备可用于成形高度在空间呈不同分布的微柱阵列, 微柱深宽最高比可

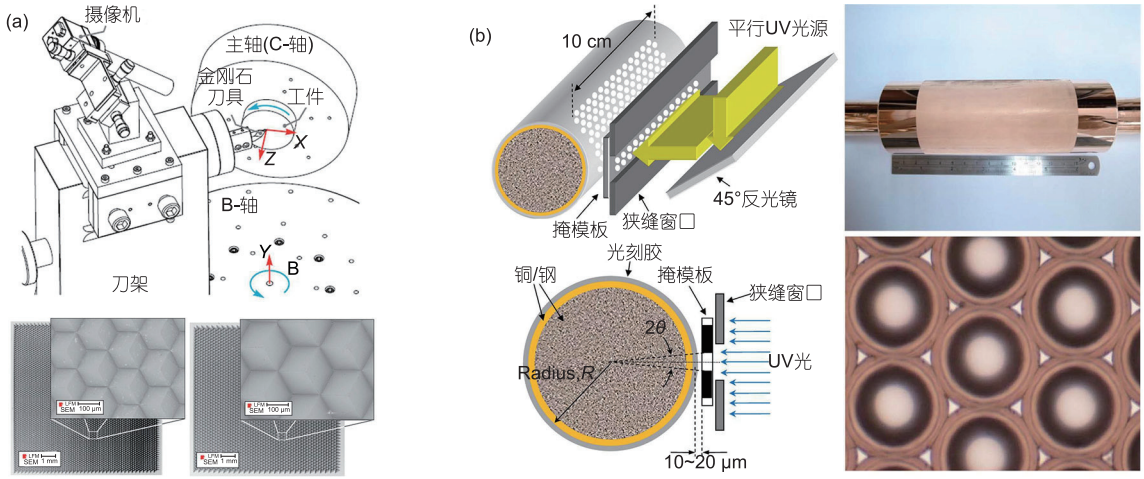

图 6 (网络版彩色)辊子模具加工方法. (a) 单点金刚石车床直接加工[68]; (b) 旋转光刻法[69]

Figure 6 (Color online) Fabrication methods of roller mold. (a) Single crystalline diamond turning method[68]; (b) step-and-rotated UV-exposure method[69]

达10:1以上, 通过调节电压可以改变UV胶的润湿角, 从而改变驱动力大小并实现不同高度微柱结构的加工. Weng等人[71]开发出电磁场辅助的UV固化成形设备, 指出在电磁场辅助作用下的成形可以获得更高精度和更高效率. Wu等人[72]引入气体辅助方法将刚性模具辊改为缠绕在一个气袋辊上的PDMS带状模具, 兼具了硬模成形设备简单和软模成形复制精度高的优点. Yang等人[73]搭建出采用软辊对气垫平台的辊压式UV固化压印成形实验设备, 并以PET为基材进行了大面积微透镜阵列的加工.

目前, 公开资料显示卷对卷UV固化成形最高速度可达5 m/min[5]. 如何保证卷对卷成形过程中光学薄膜微细结构精度是UV固化成形装备开发的关键. 柔性光学薄膜基片易于收缩和扭曲变形, 尺寸不稳定, 且决定UV胶转印率的基片表面能显著依赖于基片张力, 因此, 张力控制和定位精度对R2R UV固化成形装备至关重要. Shin等人[74]发现卷对卷工艺的长距离固化区域内, 气流易导致基片材料振动而发生侧向位移, 严重影响涂层的位置精度和厚度精度, 于是引入辊轴导向系统来控制移动基底的侧向位移. Kang等人[75]研究了R2R UV固化成形中定位问题, 以基片侧向位移和成形辊平面运动推导了倾斜纵向定位的数学模型, 指导了卷对卷装备“二维”定位控制设计并减少了纵向定位和横向定位误差, 该数学模型误差正比于基片宽度, 适用于大面积R2R UV固化成形工艺. Choi等人[76]针对非线性单跨度R2R系统建立了高精度反推式张力控制器, 并采用遗传算法优化了控制参数.

3.2 热压印成形装备

最初的热压印装备基于材料试验机发展而来, Jenoptic Microtechnic公司与Karlsruhe研究中心联合开发出第一台可实现高深宽比微细结构成形的热压印设备. 此后, Wichert Press公司开发了一款适用于工业生产环境的热压印设备, 最大压力达1000 kN, 可在直径为8英寸的面积范围内压印微细结构[77]. 这类P2P热压印工艺设备虽已发展较为成熟, 但仍旧面临工艺周期长、成形压力不均等挑战. Mekaru等人[46]将超声振动引入热压印工艺中, 有效缩短压印时间并降低成形所需的压力. Worgull等人[78]通过在成形区域周围加装边框的方法来提高压力均匀性, 当材料还未流动至边框时, 成形区域内压力分布明显不均, 而当材料流动至边框后, 成形区域内的压力分布逐渐变得均匀. He等人[79]也通过加装类似的流动坝结构, 增加聚合物材料向周围流动的流阻从而提高微细结构的成形效率及高度一致性. 为提高压印效率, Tan等人[80]最早将辊压工艺应用于聚合物表面微细结构的热压印加工中, 提出R2P热压印工艺、开发了R2P热压印实验原型并通过实验验证了该方法的可行性和工艺优势. Lan等人[81]针对R2P工艺进行了深入的研究, 并搭建了光棍-平板模具的R2P热压印实验设备. Lim等人[82]设计并开发出可用于柔性基板

连续成形的R2P压印设备，该设计方案通过控制压辊的上下运动及平板模具的左右平动来实现柔性薄膜卷材表面微细结构的间歇式连续成形.

尽管R2R热压工艺尚未大规模应用，但随着辊子模具制备方法的日趋成熟，R2R热压印工艺设备的开发及应用也在近10年内得到了迅速的发展. 如何提高充型阶段的充型率和降低脱模阶段的回弹是R2R热压印工艺的主要挑战. Ishizawa等人[83]和Velten等人[84]开发的典型R2R热压印系统一般包括可加热模具辊和支撑辊，模具辊多采用内置电感、热油循环等加热方法. 在此基础上，考虑到聚合物材料热导率低，新加坡Yeo等人[85]在R2R热压印系统前端添加了陶瓷预热模块，将聚合物薄膜在压印前加热到一定温度，能有效提高充型阶段的充型率. Jiang等人[86]将薄膜挤出压延装置和R2R热压印装置结合在一起，将聚合物充分预热后再进行压印成型. 另外，Fagan等人[87]考虑聚合物在高温条件下的形变回弹，设计了辊轮布局使聚合物薄膜在模具辊上的包覆时间增加，并设置了分步冷却来加速聚合物冷却速度，最终达到减小脱模后聚合物微结构回弹的目的. Deng等人[56,88]在开发的R2R热辊压成形系统中增设保形装置和冷却装置，延长了材料充型时间，提高了充型阶段的充型率；同时可实现快速冷却，降低了脱模回弹，如图7所示.

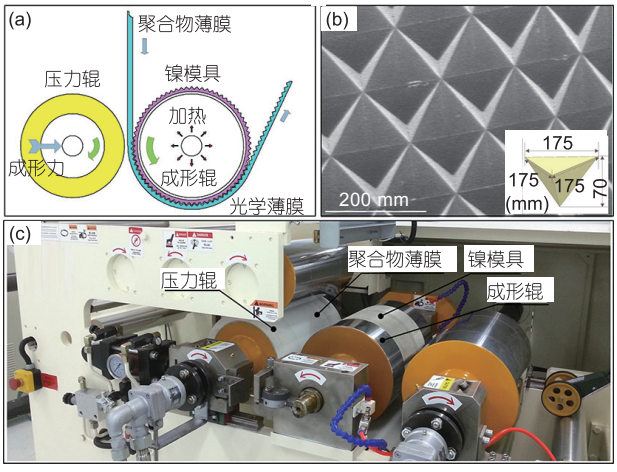

图 7 (网络版彩色)具有保形装置的 R2R 热辊压成形系统. (a) 保形原理; (b) 贴板式模具; (c) R2R 热压印成形机[56]

Figure 7 (Color online) R2R hot embossing system with shape preserving device. (a) Schematic of shape preserving; (b) nickel mold; (c) R2R hot embossing machine[56]

4 挑战与展望

光学薄膜微细结构的高精度、低成本制造是柔性显示器、薄膜太阳能电池等光电器件大批量应用的关键. UV固化和热压印成形技术几乎同时诞生于20世纪70年代，后经历了P2P，R2P和R2R的发展历程，在光学薄膜微细结构制造上取得了进展和突破，已成为光学薄膜微细结构制造的主要途径，具有广泛的应用前景. 目前，R2R紫外固化成形最高速度为5 m/min，R2R热辊压最高速度为3 m/min. 然而，带有微细结构的光学薄膜大批量、低成本应用需要达到60 m/min[5]. 为实现光学薄膜微细结构的高效、高精度和高性能制造，还需解决尺度效应建模、工艺调控、模具精度和机构控制等一系列科学技术挑战.

(1) 微米或亚微米范畴的尺度效应建模. 已有的研究证实了UV固化成形和热压印成形过程中存在尺度效应. 如何揭示尺度效应产生机理，定量描述材料、摩擦及工艺尺度效应对成形质量的影响规律尚待进一步研究，而这正是实现薄膜表面微细结构加工过程精确分析的数理基础.

(2) 光学薄膜微细结构控形控性方法. 目前的研究在材料流动特性、充型模式、工艺参数影响规律等方面取得了一定进展，但对于高深宽比结构尚需解决R2R UV固化成形工艺的脱模缺陷和R2R热压印工艺的形变回弹等问题. 同时，微细结构内部的材料取向、残余应力等物理特性对光学性能有重要影响. 尚需进一步研究UV胶材料相变阶段流固耦合行为和热塑性材料黏弹塑性行为，形成光学薄膜微细结构成形成性一体化工艺设计方法.

(3) 大面积辊子模具高精度、高一致性制造技术. 模具表面微细结构尺度在微米或亚微米范畴，而光学薄膜微细结构的大批量制造辊子模具直径可达0.5 m以上，长度可达2 m以上，如何兼顾模具单个微结构的精度和大面积辊子模具表面微结构一致性仍面临巨大挑战.

(4) 卷对卷运动的多辊机构的协调控制技术. 卷对卷方式是热压印成形和UV固化成形的总体趋势，是光学薄膜微细结构大批量、高精度连续制造的必然要求. 然而，R2R运动方式需要多道辊子协调完成微细结构包络成形、微细结构脱模、薄膜基片张紧等环节. 多辊机构的协调控制是光学薄膜微细结构制造面临的又一技术挑战.

参考文献

1 Chen J X, Huang X W, Zhou Z M. Dream OLED display: Materials and Devices (in Chinese). Beijing: Posts & Telecommunications Press, 2011 [陈金鑫, 黄孝文, 周志敏. OLED 梦幻显示器: 材料与器件. 北京: 人民邮电出版社, 2011]

2 Li Y F, Zhang F H, Mou X Y, et al. Improved light out-coupling in organic light emitting diodes employing organic capping layer (in Chinese). Chin J Liquid Cryst Displays, 2012, 27: 308–312 [李艳菲, 张方辉, 牟曦媛, 等. 利用有机覆盖层提高 OLED 出光效率. 液晶与显示, 2012, 27: 308–312]

3 Brunner R, Sandfuchs O, Pacholski C, et al. Lessons from nature: Biomimetic subwavelength structures for high-performance optics. Laser Photon Rev, 2012, 6: 641–659

4 Pagliaro M, Palmisano G. Flexible Solar Cells (in Chinese). Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2010 [Pagliaro M, Palmisano G. 柔性太阳能电池. 上海: 上海交通大学出版社, 2010]

5 Dumond J J, Low H Y. Recent developments and design challenges in continuous roller micro- and nanoimprinting. J Vac Sci Technol B, 2012, 30: 0108011

6 Bartolini R A, Feldsteina N, Ryan R J. Replication of relief-phase holograms for prerecorded video. J Elecreochem Soc, 1973, 120: 1408–1413

7 Ahn S, Cha J, Myung H, et al. Continuous ultraviolet roll nanoimprinting process for replicating large-scale nano- and micropatterns. Appl Phys Lett, 2006, 89: 213101

8 Lin X G, Zhou Z Q, Gu J N, et al. The highlights of finetech Japan 2014 in Japan: Display, touch panel and thin film. Ind Mater, 2014, 329: 157–164

9 Ye H, Shen L, Li M, et al. Bubble defect control in low-cost roll-to-roll ultraviolet imprint lithography. Micro Nano Lett, 2014, 9: 28–30

10 Morihara D, Nagaoka Y, Hiroshima H, et al. Numerical study on bubble trapping in UV nanoimprint lithography. J Vac Sci Technol B, 2009, 27: 2866–2868

11 Kim K D, Kwon H J, Choi D G, et al. Resist flow behavior in ultraviolet nanoimprint lithography as a function of contact angle with stamp and substrate. Jpn J Appl Phys, 2008, 47: 8648–8651

12 Huang P H, Huang T C, Sun Y T, et al. Large-area and thin light guide plates fabricated using UV-based imprinting. Opt Express, 2008, 16: 15033–15038

13 Hiroshima H, Komuro M. Control of bubble defects in UV nanoimprint. Jpn J Appl Phys, 2007, 46: 6391–6394

14 Ahn S H, Guo L J. Large-area roll-to-roll and roll-to-plate nanoimprint lithography: A step toward high-throughput application of continuous nanoimprinting. ACS Nano, 2009, 3: 2304–2310

15 Schmitt H, Frey L, Ryssel H, et al. UV nanoimprint materials: Surface energies, residual layers, and imprint quality. J Vac Sci Technol B, 2007, 25: 785–790

16 Ding Y, Liu H, Lu B, et al. UV curing imprint lithography for micro-structure in MEMS manufacturing. J Phys: Conf Ser, 2006, 34: 506–510

17 Yan L, Yin L, Liu H Z. Nanoimprint lithography of multistep loading. Adv Mater Res, 2012, 383: 7214–7219

18 Lan H, Ding Y, Liu H, et al. Development of a step micro-imprint lithography tool. J Micromech Microeng, 2007, 17: 2039–2048

19 Weng Y J, Weng Y C, Fang H S, et al. Application of vacuum-assisted filling system with ultraviolet-light-emitting diode array to fabrication of waveguide microstructures. Jpn J Appl Phys, 2009, 48: 116502

20 Nagaoka Y, Suzuki R, Hiroshima H, et al. Simulation of resist filling properties under condensable gas ambient in ultraviolet nanoimprint lithography. Jpn J Appl Phys, 2012, 51: 06FJ07

21 Yao D, Kim B. Simulation of the filling process in micro channels for polymeric materials. J Micromech Microeng, 2002, 12: 604

22 Tian H, Shao J, Ding Y, et al. Numerical characterization of electrohydrodynamic micro-or nano-patterning processes based on a phase-field formulation of liquid-dielectrophoresis. Langmuir, 2013, 29: 4703–4714

23 Bowman C N, Peppas N A. Coupling of kinetics and volume relaxation during polymerizations of multiacrylates and multimethacrylates. Macromolecules, 1991, 24: 1914–1920

24 Neo W K, Chan-Park M B. A new model and measurement technique for dynamic shrinkage during photopolymerization of multiacrylates. Macromol Rapid Commun, 2005, 26: 1008–1013

25 Neo W K, Chan-Park M B. Application of a new model and measurement technique for dynamic shrinkage and conversion of multiacrylates photopolymerized at different UV intensities. Polymer, 2007, 48: 3337–3348

26 Horiba A, Yasuda M, Kawata H, et al. Impact of resist shrinkage and its correction in nanoimprint lithography. Jpn J Appl Phys, 2012, 51: 06FJ06

27 Amirsadeghi A, Lee J J, Park S. Polymerization shrinkage stress measurement for a UV-curable resist in nanoimprint lithography. J Micromech Microeng, 2011, 21: 115013
28 Hirai Y. UV-nanoimprint lithography (NIL) process simulation. J Photopolym Sci Technol, 2010, 23: 25–32
29 He J Y, He Z P. Computer simulation on intensity distribution of UV irradiation system. Appl Mech Mater, 2010, 34: 591–594
30 Zhang J, Chan-Park M B, Conner S R. Effect of exposure dose on the replication fidelity and profile of very high aspect ratio microchannels in SU-8. Lab Chip, 2004, 4: 646–653
31 Kirchner R, Nüske L, Finn A, et al. Stamp-and-repeat UV-imprinting of spin-coated films: Pre-exposure and imprint defects. Microelectron Eng, 2012, 97: 117–121
32 Amirsadeghi A, Lee J J, Park S. A simulation study on the effect of cross-linking agent concentration for defect tolerant demolding in UV nanoimprint lithography. Langmuir, 2012, 28: 11546–11554
33 Chan-Park M B, Lam Y, Laulia P, et al. Simulation and investigation of factors affecting high aspect ratio UV embossing. Langmuir, 2005, 21: 2000–2007
34 Yeo L P, Joshi S C, Lam Y C, et al. Numerical analyses of peel demolding for UV embossing of high aspect ratio micro-patterning. Microsyst Technol, 2009, 15: 581–593
35 Zhou W, Zhang J, Liu Y, et al. Characterization of anti-adhesive self-assembled monolayer for nanoimprint lithography. Appl Surf Sci, 2008, 255: 2885–2889
36 Taniguchi J, Kamiya Y, Ohsaki T, et al. Technique for transfer of high-density, high-aspect-ratio nanoscale patterns in UV nanoimprint lithography and measurement of the release force. Microelectron Eng, 2010, 87: 859–863
37 Yan Y H, Chan-Park M B, Ching W C, et al. Interaction of anti-adhesive silicone films with UV embossing resin. Appl Surf Sci, 2005, 249: 332–339
38 Houle F A, Miller D C, Fornof A, et al. Nanoimprint materials systems. J Photopolym Sci Technol, 2008, 21: 563–572
39 Bartolini R, Hannan W, Karlsons D, et al. Embossed hologram motion pictures for television playback. Appl Opt, 1970, 9: 2283–2290
40 Chou S Y. Sub-10 nm imprint lithography and applications. J Vac Sci Technol B, 1997, 15: 2897–2904
41 Liu C, Li J M, Liu J S, et al. Deformation behavior of solid polymer during hot embossing process. Microelectron Eng, 2010, 87: 200–207
42 Macintyre D S, Thoms S. A study of resist flow during nanoimprint lithography. Microelectron Eng, 2005, 78–79: 670–675
43 Rowland H D, Sun A C, Schunk P R, et al. Impact of polymer film thickness and cavity size on polymer flow during embossing: Toward process design rules for nanoimprint lithography. J Micromech Microeng, 2005, 15: 2414–2425
44 Kim S M, Kang J H, Lee W I. Analysis of polymer flow in embossing stage during thermal nanoimprint lithography. Polym Eng Sci, 2011, 51: 209–217
45 Ryu J H, Lee S H, Lim H J, et al. Polymer filling behaviors with various levels of imprinting velocity in nanoimprint lithography. Microelectron Eng, 2014, 117: 67–71
46 Mekaru H. Effect of applying ultrasonic vibration in hot embossing and nanoimprint. Lithography. In: Wang M, ed. Rijeka: InTech, 2010
47 Lin C H, Chen R. Effects of mold geometries and imprinted polymer resist thickness on ultrasonic nanoimprint lithography. J Micromech Microeng, 2007, 17: 1220–1231
48 Hocheng H, Wen T T, Yang S Y. Replication of microlens arrays by gas-assisted hot embossing. Mater Manuf Process, 2008, 23: 261–268
49 Wu J T, Yang S Y, Deng W C, et al. A novel fabrication of polymer film with tapered sub-wavelength structures for anti-reflection. Microelectron Eng, 2010, 87: 1951–1954
50 Lam D C C, Yang F, Chong A C M, et al. Experiments and theory in strain gradient elasticity. J Mech Phys Solids, 2003, 51: 1477–1508
51 Nikolov S, Han C S, Raabe D. On the origin of size effects in small-strain elasticity of solid polymers. Int J Solids Struct, 2007, 44: 1582–1592
52 Yao D, Virupaksha V L, Kim B. Study on squeezing flow during nonisothermal embossing of polymer microstructures. Pol Eng Sci, 2005, 45: 652–660
53 Jena R K, Taylor H K, Lam Y C, et al. Effect of polymer orientation on pattern replication in a micro-hot embossing process: Experiments and numerical simulation. J Micromech Microeng, 2011, 21: 065007
54 Takagi H, Takahashi M, Maeda R, et al. Experimental and numerical analyses on recovery of polymer deformation after demolding in the hot embossing process. J Vac Sci Technol B, 2008, 26: 2399–2403
55 Shan X, Liu Y, Lam Y. Studies of polymer deformation and recovery in micro hot embossing. Microsyst Technol, 2008, 14: 1055–1060
56 Deng Y, Yi P, Peng L, et al. Experimental investigation on the large-area fabrication of micro-pyramid arrays by roll-to-roll hot embossing on PVC film. J Micromech Microeng, 2014, 24: 045023

57 Guo Y, Liu G, Xiong Y, et al. Study of the demolding process-implications for thermal stress, adhesion and friction control. J Micromech Microeng, 2007, 17: 9–19

58 Dirckx M E, Hardt D E. Analysis and characterization of demolding of hot embossed polymer microstructures. J Micromech Microeng, 2011, 21: 085024

59 Worgull M, Hétu J, Kabanemi K, et al. Hot embossing of microstructures: Characterization of friction during demolding. Microsyst Technol, 2008, 14: 767–773

60 Kawata H, Kubo K, Watanabe Y, et al. Effects of mold side wall profile on demolding characteristics. Jpn J Appl Phys, 2010, 49: 06GL15

61 Taylor H, Boning D, Iliescu C. A razor-blade test of the demolding energy in a thermoplastic embossing process. J Micromech Microeng, 2011, 21: 067002

62 Lee W B, Cheung C F, Tu S, et al. Integrated manufacturing technology for design, machining and measurement of freeform optics (in Chinese). Chin J Mech Eng, 2010, 46: 137–148 [李荣彬, 张志辉, 杜雪, 等. 自由曲面光学元件的设计、加工及面形测量的集成制造技术. 机械工程学报, 2010, 46: 137–148]

63 Xu Z W, Fang F Z, Zhang S J, et al. Fabrication of complicated micronano structures using focused ion beam milling method (in Chinese). J Tianjin Univ, 2009, 42: 91–94 [徐宗伟, 房丰洲, 张少婧, 等. 基于聚焦离子束铣削的复杂微纳结构制备. 天津大学学报, 2009, 42: 91–94]

64 Lu Y C, Chen L S, Wei G J, et al. Laser direct writing system of fabricating high resolution image with DMD (in Chinese). Laser J, 2007, 28: 46–47 [陆亚聪, 陈林森, 魏国军, 等. 基于 DMD 高分辨率激光直写系统设计与实现. 激光杂志, 2007, 28: 46–47]

65 Chung C K, Sher K, Syu Y, et al. Fabrication of cone-like microstructure using UV LIGA-like for light guide plate application. Microsyst Technol, 2010, 16: 1619–1624

66 Schelb M, Vannahme C, Kolew A, et al. Hot embossing of photonic crystal polymer structures with a high aspect ratio. J Micromech Microeng, 2011, 21: 025017

67 Brinksmeier E, Gläbe R, Schönemann L. Diamond micro chiseling of large-scale retroreflective arrays. Precis Eng, 2012, 36: 650–657

68 Je T J, Jeon E C, Park S C, et al. Improvement of machining quality of copper-plated roll mold by controlling temperature variation. T Nonferr Metal Soc, 2011, 21: s37–s41

69 Lee Y C, Chen H W, Hsiao F B. Fabrication of seamless roller mold for continuous roller imprinting of microlens array films. J Microelectromech Syst, 2012, 21: 316–323

70 Li X, Ding Y, Shao J, et al. Fabrication of concave microlens arrays using controllable dielectrophoretic force in template holes. Opt Lett, 2011, 36: 4083–4085

71 Weng Y C, Weng Y J, Yang S Y. A study on the application of electromagnetic-field-assisted magnetic soft mold photocuring imprinting technology in micro-structure gradient replication molding. Microelectron Eng, 2012, 96: 76–81

72 Wu J T, Yang S Y. A gasbag-roller-assisted UV imprinting technique for fabrication of a microlens array on a PMMA substrate. J Micromech Microeng, 2010, 20: 085038

73 Yang S Y, Cheng F S, Xu S W, et al. Fabrication of microlens arrays using UV micro-stamping with soft roller and gas-pressurized platform. Microelectron Eng, 2008, 85: 603–609

74 Shin H, Ho T, Lee S. Steering guide-based lateral control for roll-to-roll printed electronics. J Mech Sci Technol, 2010, 24: 319–322

75 Kang H K, Lee C W, Shin K H. Novel modeling of correlation between two-dimensional registers in large-area multilayered roll-to-roll printed electronics. Jpn J Appl Phys, 2011, 50: 016701

76 Choi K H, Tran T T, Kim D S. Back-stepping controller based web tension control for roll-to-roll web printed electronics system. J Adv Mech Des Syst, 2011, 5: 7–21

77 Mehne C, Steger R, Koltay P, et al. Large-area polymer microstructure replications through the hot embossing process using modular moulding tools. P I Mech Eng B-J Eng, 2008, 222: 93–99

78 Worgull M, Heckele M, Schomburg W K. Large-scale hot embossing. Microsyst Technol, 2005, 12: 110–115

79 He Y, Fu J, Zhao P, et al. Enhanced polymer filling and uniform shrinkage of polymer and mold in a hot embossing process. Polym Eng Sci, 2012: 1–7

80 Tan H, Gilbertson A, Chou S Y. Roller nanoimprint lithography. J Vac Sci Technol B, 1998, 16: 3926–3928

81 Lan S, Song J H, Lee M G, et al. Continuous roll-to-flat thermal imprinting process for large-area micro-pattern replication on polymer substrate. Microelectron Eng, 2010, 87: 2596–2601

82 Lim H J, Choi K B, Kim G H, et al. Roller nanoimprint lithography for flexible electronic devices of a sub-micron scale. Microelectron Eng, 2011, 88: 2017–2020

83 Ishizawa N, Idei K, Kimura T, et al. Resin micromachining by roller hot embossing. Microsyst Technol, 2008, 14: 1381–1388

84 Velten T, Schuck H, Haberer W, et al. Investigations on reel-to-reel hot embossing. Int J Adv Manuf Technol, 2010, 47: 73–80

85 Yeo L P, Ng S H, Wang Z, et al. Micro-fabrication of polymeric devices using hot roller embossing. Microelectron Eng, 2009, 86: 933–936

86 Jiang L T, Huang T C, Chiu C R, et al. Fabrication of plastic microlens arrays using hybrid extrusion rolling embossing with a metallic cylinder mold fabricated using dry film resist. Opt Express, 2007, 15: 12088–12094

87 Fagan M D, Kim B H, Yao D. A novel process for continuous thermal embossing of large-area nanopatterns onto polymer films. Adv Polym Tech, 2009, 28: 246–256

88 Deng Y J, Yi P Y, Peng L F, et al. Roll-to-roll hot embossing method and device for micro structures on polymer thin film (in Chinese). Chinese Patent, ZL 201210292620.8, 2012 [邓宇君, 易培云, 彭林法, 等. 基于卷对卷热辊压聚合物薄膜表面微结构加工装置及方法. 中国专利, ZL 201210292620.8, 2012]

Recent progress in fabrication methods for micro structures on optical thin film

YI PeiYun[1], PENG LinFa[1] & LAI XinMin[1,2]

[1] *State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;*
[2] *Shanghai Key Laboratory of Digital Manufacture for Thin-walled Structures, Shanghai 200240, China;*

Optical thin film with micro structures on the surface is expected to be widely applied on large-area optical devices such as thin film solar cells and flexible display, due to the enchancement of the light extraction efficiency or light utilization. Geometric characteristics and physical properties of micro structures such as shape precision, structural defects and residual stress, have comprehensive influence on the quality of optical thin film. Ultraviolet (UV) curing and hot embossing are two major processes for the fabrication of micro structures on the optical thin film. This review surveys the recent progress of UV curing and micro hot embossing in terms of polymeric material behavior, filling mechanism and demolding process. For the UV curing process, filling process is firstly discussed and the bubble defects, residual layer and size effect are systematicall analyzed. Then, the curing mechanism is well summarized and the effect of UV dose on the physical properties of micro structure is futher explored. Finally, the challenges in the demolding process for micro structures with high aspect ratio are cataloged and some corresponding approaches are proposed. For hot embossing process, thermoplastic polymer flow behavior is investigated and single-peak and dual-peak deformation molds are discovered. Novel methods, such as ultrasonic assisted and gas assisted process are addoped to improve the filling height. Besides, demolding temperature and demolding force are two major factors for the micro structure defects. In addition, mold fabrication techniques are comprehensively summarized into direct machining method and indrect machining method. Some innovations are also introduced for the roller mold fabrication. Furthermore, the recent advancement of roll-to-roll apparatuses for the UV curing process and hot embossing process is systematically cataloged as well. The highest rolling speed reaches 5 and 3 m/min for R2R UV curing process and R2R hot embossing process, respectively. However, the current status is still far from the final destination of 60 m/min for the large-scale industrial application. Therefore, in order to meet the final destination, technical challenges and future trends are presented for fabrication methods of micro structrues on optical thin film, in terms of size effect modeling in micro or submicro scale, process control for the comprehensive performance of micro structures, large-area mold fabrication technologies with high-precision and high-consistency, and coordinate control technology for the multi rollers in roll-to-roll movement.

optical thin film, micro sturctures, UV curing, hot embossing, roll-to-roll

doi: 10.1360/N972014-01365